

# 小行星探测科学目标进展与展望

李春来<sup>1,2</sup>, 刘建军<sup>1,2</sup>, 严 韦<sup>1,2</sup>, 封剑青<sup>1,2</sup>, 任 鑫<sup>1,2</sup>, 刘 斌<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京100101;

2. 中国科学院 月球与深空探测重点实验室, 北京100101)

**摘要:** 由于较好地保留了太阳系早期形成和演化历史的遗迹, 小行星, 尤其是近地小行星, 已成为国际深空探测领域的研究热点。介绍了小行星的定义、分类和主要探测方式, 指出目前小行星探测已进入空间探测的新时代; 总结了国际小行星探测的现状, 包括已实施和正在实施的小行星探测任务的科学目标、科学载荷配置, 以及获取的主要科学数据等; 探讨了未来小行星探测的发展趋势和主要科学问题, 并对我国未来自主小行星探测任务科学目标的制定进行了展望。

**关键词:** 小行星探测; 深空探测器; 科学目标; 有效载荷; 采样返回

中图分类号: P185.7

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)05-0424-13

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.05.003

**引用格式:** 李春来, 刘建军, 严韦, 等. 小行星探测科学目标进展与展望[J]. 深空探测学报, 2019, 6 (5): 424-436.

**Reference format:** LI C L, LIU J J, YAN W, et al. Overview of scientific objectives for minor planets exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (5): 424-436.

## 引 言

小行星 (Minor Planet/Asteroid) 指围绕太阳运行, 体积和质量比行星和矮行星小, 且不易释放出气体和尘埃的天体<sup>[1]</sup>。由于大部分小行星的内部演化程度较低, 较好地保留了太阳系早期形成和演化历史的遗迹, 因此它们的化学成分和矿物组成对研究太阳系的起源有很重要的意义, 被称为研究太阳系起源的“活化石”。

人类利用现代科技, 通过地面观测、发射人造探测器等手段, 开展小行星探测活动, 近距离甚至零距离获取科学数据, 对于研究太阳系的起源和演化历史, 探索生命起源的可能途径, 保障地球的安全等具有重要现实意义。

本文将首先介绍小行星的定义、分类和主要探测方式; 在此基础上, 总结目前已实施和正在实施的国际小行星探测任务的科学目标、搭载的科学载荷以及获取的主要科学数据等内容, 探讨未来小行星探测的发展趋势和主要科学问题, 并展望我国未来小行星探测任务的科学目标。

## 1 小行星概述

### 1.1 小行星的定义

国际天文学联合会 (International Astronomical Union, IAU) 2006年第26届大会对太阳系行星进行了新的定义 (RESOLUTION 5A<sup>[2]</sup>), 按照该定义, 太阳系天体被分为行星、矮行星以及太阳系小天体 (Small Solar System Body, SSSB) 三类, 即小行星和彗星被重新归类为矮行星和太阳系小天体, 如图1

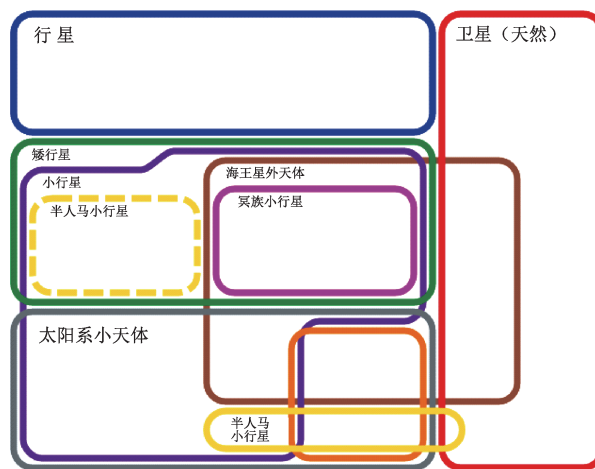


图1 IAU定义中的太阳系天体分类<sup>[2]</sup>  
Fig. 1 The classification of celestial bodies in the solar system by IAU<sup>[2]</sup>

所示。可见,除了行星、彗星、天然卫星,以及被IAU认定为矮行星的天体之外,太阳系中其它绕太阳公转的天体都被称为小行星。

小行星主要指公转轨道在小行星主带(Main-Belt,位于火星和木星之间)以内的天体,超过90%的小行星位于小行星主带附近<sup>[3]</sup>,其子类还包括特洛伊小行星(Trojans)、半人马小行星(Centaurs)以及海王星外天体(Trans-Neptunian Objects, TNOs)等等。小行星表面的反照率一般较小,只有灶神星(Vesta)具有较高的表面反照率,能够通过肉眼观测到<sup>[4]</sup>。

小行星在特征上有别于彗星和流星体。由于大多数小行星的形成位置更接近于太阳,因此其内部已很少保存有与彗星类似的冰质结构,而主要由难熔矿物和岩石组成;小行星与流星体的主要区别在于尺寸,流星体的直径通常小于1 m,而小行星的直径则要大于1 m<sup>[5]</sup>。

关于小行星的成因,目前天文学家普遍认可的观点是小行星是太阳系形成过程中没有形成行星的残留物质<sup>[6-7]</sup>。太阳系形成过程中,木星的质量增长速度最快,当木星质量增长到接近目前状态时,其引力扰动将抑制轨道范围内另一颗行星的形成。在木星引力扰动作用下,小行星主带内的残余物质将不断碰撞和破碎,无法聚集形成行星,最终形成小行星主带中的小行星。其余一些碎片更是被驱赶出它们的轨道,与其它行星相撞,成为其它行星的一部分,或成为柯伊伯带小行星等太阳系小天体。

## 1.2 小行星分类

小行星的分类主要依据两种参数,一种基于小行星的轨道位置特征,另一种基于小行星的光谱特性。

### 1) 按轨道位置特征分类的小行星类型

按照小行星轨道与太阳之间的位置关系,可将小行星分为内太阳系小行星和外太阳系小行星。其中,内太阳系小行星主要包括近地小行星(Near Earth Asteroids, NEAs)、主带小行星(Main-Belt Asteroids)、以及特洛伊小行星(Trojans)(见图2,蓝线为行星轨道,红色为近地小行星(示例),白色为主带小行星,绿色为木星特洛伊小行星);外太阳系小行星主要包括半人马小行星(Centaurs)和海王星外小行星(Trans-Neptunian Objects, TNOs)(见图3,黄色原点表示太阳,J、S、U和N分别表示木星、土星、天王星和海王星,灰色表示特洛伊小行星(木星),绿色表示半人马小行星,蓝色表示柯伊伯带小行星,橙色表示黄道离散盘天体)。

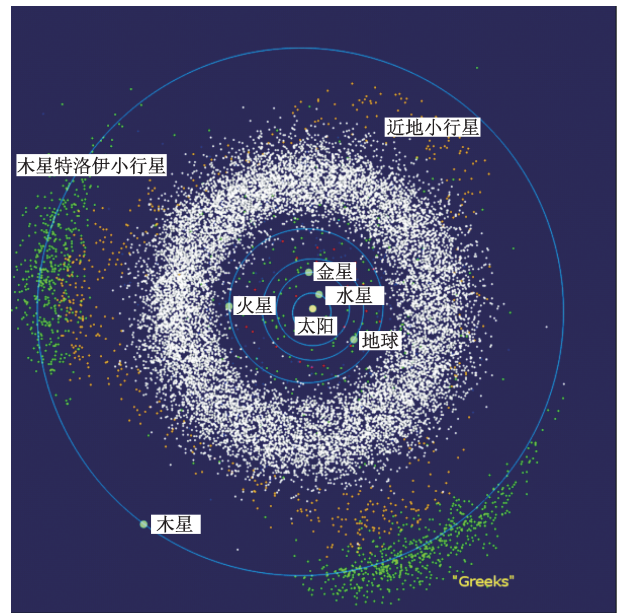


图2 内太阳系小行星分布示意图(来自网络)  
Fig. 2 Distribution of internal solar system minor planets (from Internet)

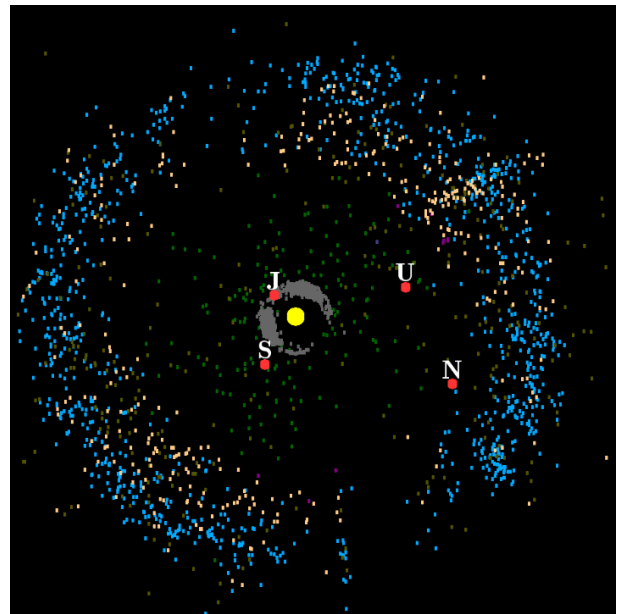


图3 外太阳系小行星分布示意图(来自网络)  
Fig. 3 Distribution of outer solar system minor planets (from Internet)

主带小行星是数量最多的小行星,占有观测到的小行星数量的92.3%<sup>[3]</sup>;近地小行星又可以细分为Atira、Aten、Apollo、Amor等类型<sup>[8]</sup>,近年来已逐渐成为国际深空探测的热点对象;特洛伊小行星最初指木星轨道的L4和L5点附近存在的小行星<sup>[9]</sup>,随着观测的深入,在火星、地球、海王星等行星的L4和L5点附近,也都发现了此类小行星<sup>[10-13]</sup>;半人马小行星的轨道通常是不稳定的,因为它们将穿越一个或多个

巨行星的公转轨道,受到较强的轨道摄动,大多数半人马小行星轨道的动力学稳定周期都只有百万年量级<sup>[14]</sup>;海王星外天体包括除冥王星(已归于矮行星)外的冥族小行星(Plutoids),以及柯伊伯带(Kuiper belt)天体、黄道离散盘天体(Scattered Disc Objects)、以及奥尔特云(Oort Cloud)天体3个扩展子类,此外,目前还发现12颗超远海王星外天体(Extreme Trans-Neptunian Objects, ETNOs)<sup>[15]</sup>。

## 2) 按光谱特性分类的小行星

由于小行星表面物质的性质(例如成分、颗粒分布等)不同,其反射太阳光的性质也不同,因此可以根据小行星在可见光波段、可见近红外波段等的光谱反射特性,对小行星进行分类。

目前较新的、应用较为广泛的小行星光谱类型分类方法是主带小行星光谱巡天(Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey, SMASS)分类法<sup>[16-17]</sup>,由Schelte J. Bus和Richard P. Binzel于2002年提出。在SMASS分类法的基础上,Francesca E. DeMeo等人进一步改进了小行星光谱分类方法,基本保留了Bus的分类,并对光谱子类进行了删减、合并和新增,最终将小行星分为三大类共计24个光谱子类<sup>[18]</sup>,其中三大光谱类型分别为C型小行星(含碳质小行星)、S型小行星(含硅质,即石质为主的小行星),以及X型小行星(金属小行星)。

基于上述的小行星光谱分类和数据,法国国家科学研究院(Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS)天体力学与星历学院(Institut de Mécanique Céleste et de Calcul Des Éphémérides)建立了M4AST(Modeling for Asteroid)光谱库,用于对小行星光谱进行查询和分类<sup>[19]</sup>。

## 1.3 小行星探测方式

对小行星的观测已经历了200多年的历史,观测手段也由目视观测、照相观测、CCD和大望远镜观测等地面观测发展到空间探测。

### 1) 地面观测

20世纪90年代以前,小行星探测主要通过地面观测完成。随着新的大尺度、高灵敏CCD技术的应用,以及大口径的望远镜的投入,小行星的地面观测数据越来越多,观测数据也更加完备。目前,用于观测小行星大小和形状的地面观测主要方法有:望远镜直接观测、掩星法、地基雷达观测、斑痕干涉法以及辐射法等。然而,即使是目前观测精度最高的哈勃天文望远镜,也仅能观测到一些体积较大的小行星的少量表面细节,仍有很多模糊的光斑无法辨认<sup>[20]</sup>,对小

行星的近距离探测迫在眉睫。

此外,对小行星的研究工作还可以通过对陨落到地面的小行星碎片(即陨石)进行研究。在所有目前发现的陨石中,大约有92.8%是由硅酸盐石质组成的,5.7%是由铁和镍组成的,剩余的则是石铁混合物。

### 2) 空间探测

空间探测可以使用相机、雷达、多波段光谱探测等手段对小行星进行详细的测绘和成分分析,甚至可以直接采样返回。

目前,国际上已经开展了多次小行星空间探测。1991年10月,美国伽利略木星探测器(Galileo)成功地飞越了小行星951 Gaspra,是人类第一次近距离、高精度的小行星探测;1993年8月,Galileo探测器又飞越了小行星243 Ida;2010年6月,日本“隼鸟号”(Hayabusa)探测器成功实现了小行星25143 Itokawa采样返回,成为世界上首个实现小行星采样返回任务的探测器。

小行星空间探测的另外一个方向是普查式的探测,丹麦的Bering项目<sup>[21]</sup>和法国的EUNEOS项目<sup>[22]</sup>都计划采用发射空间望远镜的方式来探测大量亚千米级的小行星。未来甚至可以考虑将空间望远镜直接搭载在近地小行星的表面,实现对小行星带的巡天观测。

## 2 小行星空间探测现状

小行星空间探测已有30多年历史,美、欧、日等国均先后完成了各自独特的标志性任务。目前,成功实施的小行星探测任务共计6次,实现了飞越、伴飞、采样返回等多种方式的探测,其中,美国“黎明号”(Dawn)探测器仍在围绕Ceres飞行,日本“隼鸟2号”(Hayabusa-2)和美国“源光谱释义资源安全风化层辨认”探测器(Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security Regolith Explorer, OSIRIS-Rex)的采样返回任务正在实施途中。另外,还有其它不是探测小行星的深空探测任务在飞行途中或者完成主任务之后也飞越并探测了一些小行星,例如美国“伽利略号”(Galileo)探测器在飞往木星的途中飞越小行星951 Gaspra和243 Ida,欧洲航天局(European Space Agency,ESA)的“罗塞塔号”(Rosetta)探测器在飞往彗星67P的途中飞越了小行星2867 Steins和21 Lutetia<sup>[23-24]</sup>,我国“嫦娥2号”(Chang'E-2)探测器在拓展任务期间成功飞越小行星4179 Toutatis(详见表1)。



表1 小行星探测任务汇总表  
Table 1 Summary of international Minor Planets exploration missions

探测器	国家/组织	探测对象	编号	关键事件
Galileo (主要探测木星)	美国	Gaspra	951	1991.10.29 飞越小行星(S型小行星)
		Ida	243	1993.8.28 飞越小行星(S型小行星)
NEAR-Shoemaker	美国	Eros(爱神星)	433	1996.2.17 发射,2000.2.14 飞抵小行星(近地小行星),开展为期1年的低轨道绕飞探测,2001.2.12 软着陆爱神号
		Mathilde	253	1997.6 飞越小行星(C型小行星)
Deep Space 1	美国	Braille	9969	1998.10.24 发射,1999.7 飞越小行星,探测大小、形状、表面特征、亮度、质量密度等
Hayabusa	日本	itokawa	25143	2003.5.9 发射,2005.9.12 飞抵小行星20 km 轨道(S型小行星),2005.11.19 小行星着陆,2007.4 开始返回,2010.6.13 成功返回(澳大利亚沙漠)
Rosetta (主要探测彗星 67P)	ESA	Steins	2867	2008.9.5 飞越小行星(7 min)
		Lutetia	21	2010.7.10 飞越小行星
Chang'E-2 (月球探测)	中国	toutatis	4179	2012.12.13 飞越小行星
Dawn	美国	Vesta(灶神星)	4	2007.9.27 发射,2011.7.16 抵达灶神星,2012.9月离开灶神星轨道
		Ceres(谷神星)	1	已归于矮行星
Hayabusa-2	日本	Ryugu	162173	2014.12.3 发射,2018.6.27 到达小行星(C型小行星)
OSIRIS-REx	美国	Bennu	101955	2016.9.8 发射

从发展历程看,国际小行星探测经历了从近距离飞越(如 Galileo、Deep Space 1 和 Chang'E-2 等任务,其中 Galileo 任务飞越的小行星 243 Ida 是人类第一次发现拥有天然卫星的小行星),到绕飞探测(如 NEAR 和 Dawn 探测任务),再到目前的小行星附着就位探测和表面采样返回(如 Hayabusa、Hayabusa-2 和 OSIRIS-Rex 等)几个阶段;从探测对象看,近地小行星是小行星探测任务的首选目标,例如美国“NEAR-Shoemaker 计划”(爱神星(433 Eros))、“日本 Hayabusa 计划”(25143 Itokawa),以及正在实施的美国“OSIRIS-REx 计划”(101955 Bennu)和日本“Hayabusa-2 计划”(1999 JU3),都选择了近地小行星进行专门探测。

### 2.1 Galileo 计划

美国国家航空航天局(National Aeronautics Space Administration, NASA)的“Galileo 计划”于 1989 年 10 月开始实施,历时 14 年。“Galileo 计划”为木星探测任务,探测器飞往木星途中探测了 2 颗小行星。

Galileo 探测器搭载的科学载荷主要包括:固体成像照相机(SSC)、近红外成像光谱仪(NIMS)、紫外线光谱仪(UVS)、光偏振辐射计(PPR)、磁力计(MAG)、粉尘探测器(DDE)、等离子探测器(PLS)、高能粒子探测器(EPD)、等离子体波探测器(PWS)、以及重离子计数器(HIC),共计 10 台科

学载荷<sup>[25]</sup>。

1991 年 10 月 29 日, Galileo 探测器飞越小行星 951 Gaspra,这是人造探测器第一次与小行星相遇,共传回了 57 张影像<sup>[26]</sup>;1993 年 8 月 28 日, Galileo 探测器又飞越小行星 243 Ida,固体成像照相机(SSC)用 6 个可见光谱段对 243 Ida 进行了成像,并惊奇地发现 Ida 小行星拥有卫星(该卫星被命名为 Dactyl,见图 4),这是人类第一次发现拥有天然卫星的小行星。

951 Gaspra 于 1916 年由俄罗斯天文学家发现,是一颗 S 型小行星。通过分析固体成像照相机(SSC)获得的覆盖 Gaspra 表面 80% 的影像可知, Gaspra 是一个形状极不规则的天体,3 条主半径长度分别为 18.2 km、10.5 km 和 8.9 km。Gaspra 的不规则形状表明其可能是由更大的天体经过剧烈碰撞后产生的。Gaspra 表面的地形地貌还表明它是一个单一致密的天体而非一个碎石堆。对其表面的撞击坑年龄进行估算认为它们形成于 2 000 万~3 亿年前。光谱数据分析表明, Gaspra 的光度特性与月球非常相似,平均几何反照率为 0.23<sup>[26]</sup>。

243 Ida 于 1884 年被发现,也是一颗 S 型小行星。从 Galileo 的固体成像照相机(SSC)影像分析可知, Ida 的形状不规则,拟合出的最佳三轴椭球体(29.9 km×12.7 km×9.3 km)与其真实形状有较大偏差, Ida 更接近于一个半月形星体。



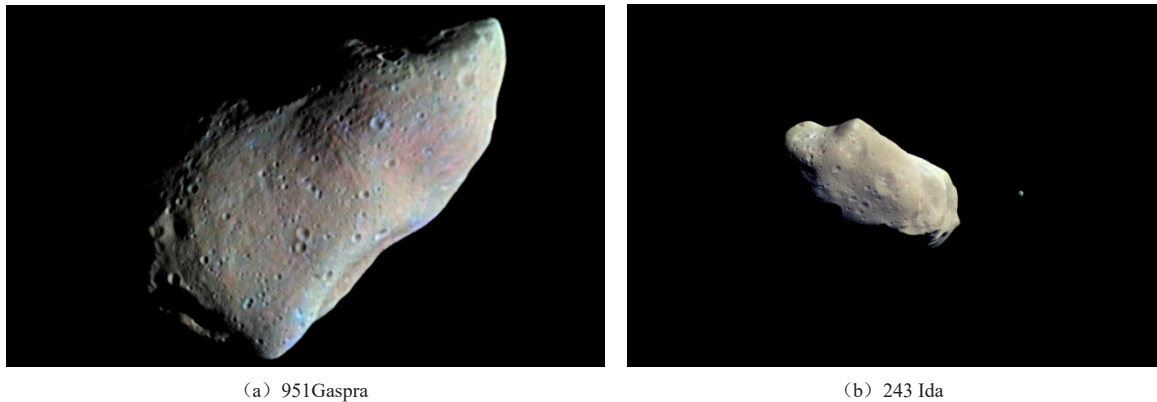


图4 小行星951Gaspra和243 Ida  
Fig. 4 Asteroids 951Gaspra and 243 Ida

## 2.2 NEAR-Shoemaker计划

该计划由NASA和约翰霍普金斯大学应用物理学实验室 (Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, APL) 于1996年2月实施, 对爱神星 (433 Eros) 进行了绕飞探测。其科学目标主要包括: 确定小行星主要物理参数——大小、形状、构型、体积、质量、密度和自转轴; 测量小行星表面化学成分和矿物组成; 探测Eros的表面形貌特征; 分析Eros表面风化层的特征及其演化机理; 测量Eros和太阳风的相互作用、寻找可能的内部磁场; 通过对Eros周围尘埃和气体的测量来寻找其活动的证据; 确定Eros的内部结构<sup>[27]</sup>。

NEAR探测器搭载科学载荷主要包括: 多光谱成像仪 (MSI)、近红外分光计 (NIS)、X-射线/Gamma射线光谱仪 (XGRS)、NEAR激光高度计 (NLR)、磁力计 (MAG) 以及无线电科学和重力实验装置等。

1997年6月, NEAR探测器在距离1200 km处对小行星253 Mathilde进行了飞越, 探测到Mathilde的主要组成成分为黑色物质, 该物质在过去的45亿年间基本没有变化; 2000年2月14日, 探测器进入323 km×370 km的Eros绕飞轨道, 从4月10日开始, 轨道从椭圆形变到圆形 (100 km高), 到12月再次降轨到35 km高。“近地小行星交会” (Near Earth Asteroid Rendezvous, NEAR) 探测器NEAR探测器在Eros的轨道上运行了超过12个月, 期间确定了Eros的物理和地质学特征, 测量了Eros的元素和矿物分布; 2001年2月12日, NEAR探测器在Eros南部的Himeros撞击坑附近成功实现了软着陆。

NEAR探测器绕Eros轨道工作的一年多时间中, 共传回了约1.6万张影像, 这些影像实现了对Eros的全面覆盖; 同时, 获取了1100万个激光测距数据,

这些数据提供了Eros表面的地形信息<sup>[28]</sup>。在着陆前的一段时间, NEAR探测器传回了Eros表面的60张近摄影像, 分辨率达到几十厘米。由于着陆十分平稳, 着陆后NEAR探测器的无线电设备仍能够继续传回信号<sup>[29]</sup>。

253 Mathilde是1885年11月12日被发现的。NEAR探测器的多光谱成像仪发现253 Mathilde至少有5个直径大于20 km的表面黝黑的陨击坑分布在其向阳面上, 该小行星近60%的表面没有发现颜色和反照率的变化, 应该是行星形成过程中的富碳物质, 是太阳系最原始的物质<sup>[30]</sup>。

Eros是第一个被发现的近地小行星, 也是第二大的近地小行星。Eros的几何形状极不规则, 具有马铃薯状的外形。NEAR的探测数据表明, 该小行星具有多样化的表面组成; 其大小为33 km×13 km×13 km, 没有卫星, 密度是2.7 g/cm<sup>3</sup>; 有20 km长的山脉状形态, 密度较高, 表明它可能是大天体撞击碎裂的残余物; 表面有陨击坑, 两个最大的陨击坑直径分别是8.5 km和6.5 km, 表面陨击坑数量少而小, 表明比Ida相对年轻。

## 2.3 Deep Space 1计划

Deep Space 1是NASA新千年计划 (New Millennium Program) 的一部分, 于1998年实施。其主要探测任务是飞越小行星9969 Braille, 同时, 该任务还将实现与彗星19P/Borrelly的“相遇”, 以验证太阳电动引擎、自导航系统、高级微电子和通讯设备、以及其他的尖端技术, 为后续深空探测任务提供试验数据<sup>[31]</sup>。

Deep Space 1搭载的科学载荷主要包括: 相机-光谱综合仪 (MICAS)、行星探测等离子实验设备 (PEPE) 以及离子推进系统 (IPS) 等。

“深空1号”(Deep Space 1)探测器于1999年7月29日在26 km的高度飞越近地小行星9969 Braille, 相对速度为15.5 km/s; 2001年9月22日, 探测器飞越彗星19P/Borrelly并传回了优质的彗星照片。该任务探测了彗星和小行星的大小、形状、表面特征、亮度、质量、密度、彗星核的自转状态, 研究了彗发的等离子体特征、彗发和太阳风的相互作用、亮度和彗星核喷发的尘埃和气体流的特征。

光谱数据显示, Braille中辉石与橄榄石的含量基本相等, 这与Q型小行星的光谱非常接近, 并与普通球粒状陨石的的光谱接近。Braille的几何反照率很高, 约为0.34, 星体的表面较年轻, 可能源于比较新的撞击活动<sup>[31]</sup>。

#### 2.4 JAXA小行星探测计划

近年来, 日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)开展了“隼鸟号”(Hayabusa)、“隼鸟2号”(Hayabusa-2)等小行星采样返回计划。

Hayabusa是世界上第一个小行星样品返回计划, 其主要的科学目标包括: 探测小行星25143 Itokawa(以日本火箭之父丝川命名)的质量、体积、形状、自转状态、物质成分、内部结构等; 结合地面观测、空间遥感探测与试验室的陨石分析, 研究S型小行星与陨石的相关性; 理解小行星的热改变作用与历史; 为研究早期太阳系的性质提供重要信息<sup>[32]</sup>。Hayabusa于2003年5月9日发射, 2005年9月12日与小行星25143 Itokawa交会, 2005年11月19日在小行星上登陆并开始进行样品采集, 2010年6月13日带着小行星样品顺利返回地面。Hayabusa还验证了一些新技术, 包括离子发动机技术、自动控制和导航技术、微重力下的样品采集技术、再入舱技术等。

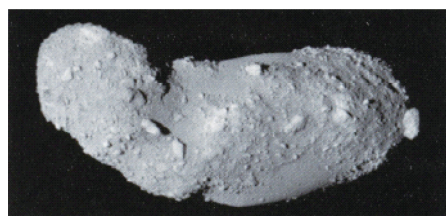
Hayabusa搭载的科学载荷主要包括: 光学导航照相机(ONC)、光探测和测距仪(LIDAR)、激光测距仪(LRF)、扇形光束传感器(FBS)以及X射线/红外射线分光计等。

小行星25143 Itokawa是一颗S型小行星, 最长轴仅为500 m。Hayabusa对其进行了两个阶段的拍图, 第1阶段是在距离小行星20 km的高度进行的, 而第2阶段将距离小行星的高度降低到了7 km, 获取更多高相位角的影像。高分辨率的观测结果表明, Itokawa整体形状非常接近于一只具有头部和身体的海獭, 与其他S型小行星相比, Itokawa的密度明显偏低, 仅为 $1.95 \text{ g/cm}^3$ <sup>[33]</sup>。该小行星的表面可以划分为两个单元, 包含大粒卵石的粗糙地形以及包含小颗粒

物质的平滑地形。以上各种特性都说明, Itokawa不是一个单一致密的天体, 而是碎石的聚集体。对返回样品在地面实验室中进行了氨基酸、多环芳香烃等有机化合物的分析测试, 结果证明Itokawa的有机化合物属于非生物成因。



(a) “隼鸟号”探测器



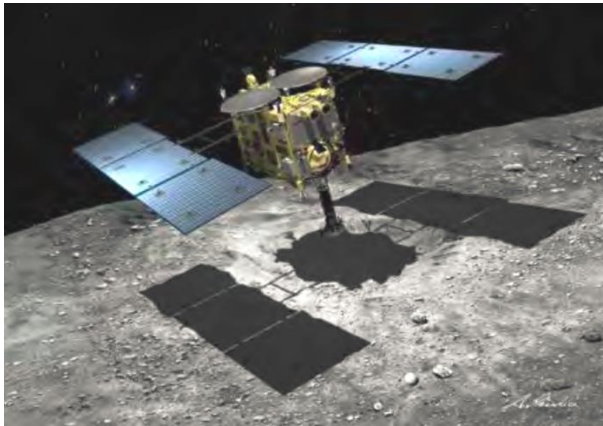
(b) 小行星25143 Itokawa

图5 Hayabusa探测器和小行星25143 Itokawa  
Fig. 5 Hayabusa and asteroid 25143 Itokawa

Hayabusa计划成功实施后, JAXA于2014年12月3日实施了另一项小行星采样返回计划: Hayabusa-2, 探测目标是一颗原始碳质近地小行星(C型小行星)162173 Ryugu(1999 JU3)。原始碳质近地小行星被认为保留了太阳系形成过程中最原始的矿物成分、矿物混合物、冰以及由上述物质混合而成的各种有机化合物, 对其的研究有助于人们进一步解释内行星的起源和演化问题, 尤其是地球上水和有机化合物的起源问题<sup>[34]</sup>。Hayabusa-2在Hayabusa探测器基础上进行了大量技术改进, 并携带了多种科学载荷用于遥感探测和样品采集, 包括光学导航相机、近红外相机、热红外相机、激光测距仪以及各种采样装置等, 同时, 配备了4台小型巡视器(MASCOT、Rover-1A、Rover-1B以及Rover-2), 服务于采样地区的环境和地质背景研究。2018年6月27日, Hayabusa-2与162173 Ryugu交会, 在距离小行星约20 km的距离上对其进行拍照等遥感探测<sup>[35]</sup>; 7月16日, 探测器降低

轨道高度，并于9月21日释放了2个巡视器（Rover-1A和Rover-1B），用于探测数据传输<sup>[36]</sup>；10月3日，MASCOT也成功实现软着陆并按计划工作了16 h<sup>[37]</sup>。在随后的约1年半时间里，Hayabusa-2将进行3次采样，采样对象分别是具有含水矿物特征的表面风化层、具有不可观察的或较弱蚀变特征的表面风化层

以及下表层矿物，每种样品预计采样0.1 g，按目前计划<sup>[38]</sup>，第1次采样将在2018年10月底进行，第2次采样计划在2019年2月进行，第3次采样计划在2019年4—5月之间进行。3次采样结束后，探测器将于2019年12月离开小行星，并于2020年12月返回地球<sup>[39]</sup>。



(a) “隼鸟2号”探测器



(b) 小行星 162173 Ryugu

图6 Hayabusa-2探测器和小行星 162173 Ryugu

Fig. 6 Hayabusa-2 and asteroid 162173 Ryugu

## 2.5 Rosetta 任务

“罗塞塔号”（Rosetta）探测器由ESA研发，是首个伴飞彗星、首次着陆彗星、首次采用微波辐射计和紫外光谱仪探测彗星的探测器，也是首个仅以太阳能电池为主要能源飞往木星轨道的探测器。

Rosetta于2004年3月2日发射，其主要任务是探测彗星67P/Churyumov-Gerasimenko，但在其飞行途中分别对小行星2867 Steins和21 Lutetia进行了飞越探测。

2008年9月5日，Rosetta飞越了小行星2867 Steins，飞越时距离小行星大约800 km，相对速度约为8.6 km/s。尽管此次飞越时间只有大约7 min，Rosetta仍旧获得了不少数据。Steins是Rosetta计划飞越的两颗小行星中的第一颗，另一颗为小行星21 Lutetia。轨道器成像系统（OSIRIS）的探测结果显示，Steins形如钻石，在其表面有一个直径约为2.1 km的撞击坑，科研人员对此也感到十分惊奇，Steins竟能在如此大的撞击事件后幸存下来。此次飞越测定的Steins小行星大小为6.67 km × 5.81 km × 4.47 km（见图7）。

2010年7月10日，Rosetta探测器又飞越了小行星21 Lutetia，其飞越距离不到3 200 km，飞越时相对速度为15 km/s。此次飞越，Rosetta拍摄了Lutetia的大量图像，覆盖了超过50%的小行星表面（主要

集中在北半球），其分辨率达到了60 m，波段范围在0.24~1 μm。通过此次飞越，Rosetta探测器测定了Lutetia的质量为 $(1.700 \pm 0.017) \times 10^{18}$  kg，该质量比飞越前预估的质量 $2.57 \times 10^{18}$  kg要小，其密度为 $(3.4 \pm 0.3)$  g/cm<sup>3</sup>，因此Lutetia的孔隙度可能在10%~15%。探测结果显示Lutetia的密度超过了一般的石质陨石的密度。



图7 小行星 2867 Steins

Fig. 7 Asteroids 2867 Steins

## 2.6 Chang'E-2 拓展任务

我国“嫦娥2号”探测器于2010年10月1日发射，历时近7个月，顺利完成了月球探测任务，于2011年6月开始拓展任务。2012年12月13日16时30分09秒，Chang'E-2以10.73 km/s的相对速度，与小行星4179 Toutatis由远及近擦身而过，首次实现了我



国对小行星的飞越探测。交会时 Chang'E-2 与小行星最近相对距离达到 3.2 km，探测器星载监视相机对小行星进行了光学成像，这是国际上首次实现对该小行星的近距离探测。

小行星 4179 Toutatis 的长度约 4.46 km，宽度约 2.4 km，是迄今为止靠近地球的最大的小行星之一。它的形状看起来就像一颗多瘤的花生，中间长而窄，两侧存在大小不等的突出物，且质量分布也呈现出很

不均匀的特征。

利用 Chang'E-2 拓展任务期间获得的小行星图像数据，测算分析了其表面撞击坑和岩块的大小和分布特征，建立了该小行星的光学多面体模型。研究结果表明，该小行星曾遭受大量小天体撞击，其中南部地区直径近 800 m 的大型撞击坑由直径约 50 m 的撞击体轰击形成；提出了 Toutatis 很可能是一颗具有碎石堆结构的密近双小行星的观点<sup>[40]</sup>。

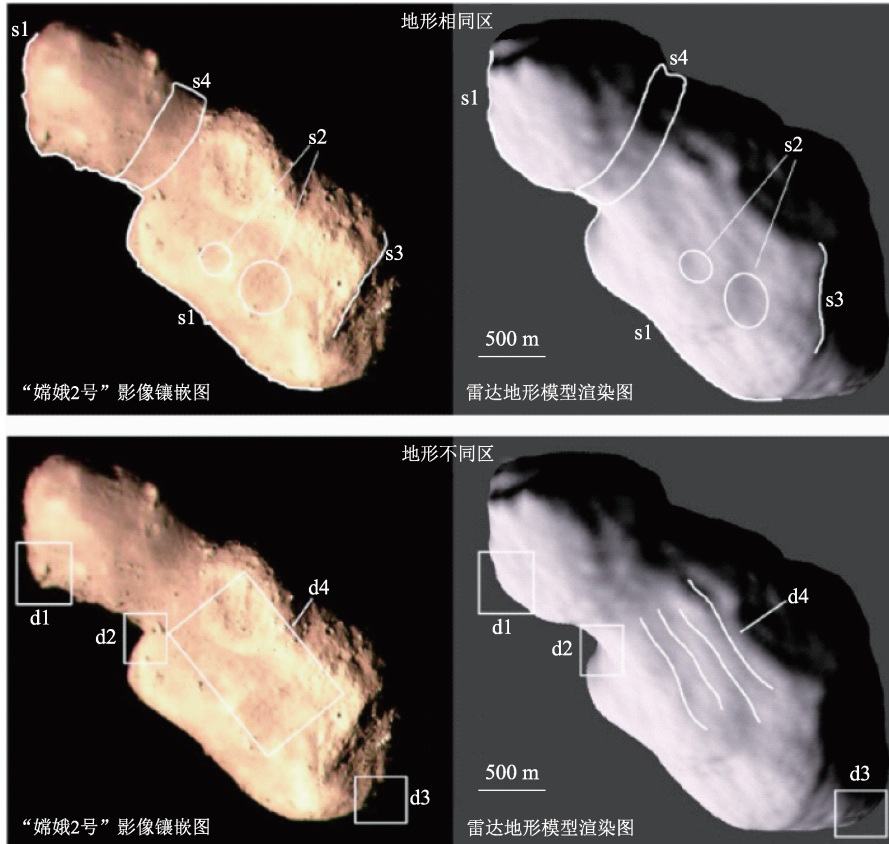


图8 小行星 4179 Toutatis 研究结果  
Fig. 8 Research results of asteroid 4179 Toutatis

### 2.7 Dawn 计划

Dawn 计划是由 NASA 实施的一项主带小行星探测任务，探测目标是小行星 4 Vesta 和矮行星 1 Ceres，主要科学目标是观察太阳系早期行星形成和演化的条件和过程，通过测量小行星的质量、形状、体积、自转轴和重力场，探测其内部结构、密度和地质环境<sup>[41]</sup>。

Dawn 探测器搭载的科学载荷包括：可见/红外光谱仪 (VIR)、Gamma 射线/中子探测器 (GRaND) 以及框幅式相机 (FC)。

Dawn 探测器于 2007 年 9 月 27 日发射；2011 年 7 月 16 日到达小行星 4 Vesta，进行了为期 14 个月的探测任务；2015 年 3 月 6 日，探测器到达了矮行星 1 Ce-

res。2017 年 10 月 19 日，NASA 宣布 Dawn 探测器将一直运行到燃料耗尽，目前探测器正在围绕 1 Ceres 飞行<sup>[42]</sup>。

Dawn 关注的是 2 个太阳系最初形成的天体，1 Ceres 和 4 Vesta，获取的探测数据主要包括：小行星表面图像数据；0.35~0.9 μm, 0.8~2.5 μm, 2.4~5.0 μm 3 个波段范围的分光计表面探测；Fe、Ti、O、Si、Ca、U、Th、K、H、Al、Mg 的丰度；4Vesta 和 1Ceres 重力场。通过拍摄 4Vesta 和 1Ceres 的表面图像，可以确定它们的撞击和地质运动的历史；通过对其表面的化学元素和矿物成分进行分析，能够决定小行星的热变质历史，确定其与陨石的联系；通过测量重力场和自转轴状态，可以界定其金属核的大小；利

用红外和 $\gamma$ 射线的光谱数据,可以测定搜索含水矿物质的存在。

### 2.8 OSIRIS-REx 计划

“OSIRIS-REx”计划是美国首个小行星采样返回深空探测任务,于2016年9月8日发射,探测目标为一颗C型小行星101955 Benu,计划于2023年9月将样品带回地球<sup>[43]</sup>。

OSIRIS-REx 的科学载荷包括:相机套件(OCAMS),用来对小行星进行拍照,对采样区进行拍照并记录整个采样返回过程;激光高度计(OLA);热辐射光谱仪(OTES),用于测量小行星的矿物和热辐射能谱以及采集当地的红外热辐射数据,可采集红外光谱范围为(5~50  $\mu\text{m}$ );可见红外光谱仪(OVIRS);用于确定小行星全球矿物和有机物的分布,并采集候选采样区的能谱信息(分辨率0.08~2 m),也可以获得全球能谱图(分辨率20 m);风化层、表层X射线绘图光谱仪(REXIS),用于探测小行星表层的元素及其丰度;采样返回系统(TAGSAM)。

小行星101955 Benu直径大约580 m,绕太阳的轨道约8300万~1.26亿英里(约1.3~2.0亿km),与地球轨道的摆动距离在28万英里(约45万km)以内,大约比月球远4万英里(约6.4万km)。OSIRIS-REx对其探测的科学目标包括<sup>[43]</sup>:返回原始C型小行星的样品并进行实验室分析;描绘该小行星的全球影像、化学,以及矿物学特征,表征其地质和历史动态,并提供采集样本的背景;测量采样区的光谱特性;测量该小行星的雅科夫斯基效应;与地基望远镜观测数据进行比较。

## 3 小行星探测发展趋势和主要科学问题

### 3.1 小行星探测发展趋势

由国际小行星探测任务的发展历程可以看出,随着探测能力的不断提高,小行星探测已全面进入了空间探测的新时代,其发展趋势可总结如下:

1) 从早期在探测大行星的途中顺带探测小行星,到设立专门的小行星探测任务;

2) 从早期飞越探测,到近期的伴飞和附着探测,再到采样返回;

3) 从对表面进行简单的照相观测,发展到对小行星进行多波段观测;

4) 从远距离(几千千米)、低分辨率的探测小行星的形态等基本特征,转化成近距离绕飞,甚至着陆探测小行星的详细物理、化学特征和矿物成分测量;

5) 从探测小行星的表面的特征,发展到探测小天体的内部结构、内部物质组成;

6) 从单个小行星的探测,逐渐发展为多个小行星的单次任务探测;

7) 若干个小行星作为探测目标的详细探测和大量小天体的普查式探测并行发展;

8) 单纯技术驱动力作用下的科学探测和研究已经越来越不能满足现今小行星探测活动的需要,未来小行星探测将逐步过渡到以科学引领为主,科学与技术协调发展、互相促进的新阶段;

9) 通过对近地小行星物理化学性质、内部结构、内部成分构成等方面的研究,可以对该小行星与地球的碰撞情况进行模拟,从而为规避近地天体碰撞提供数据支撑;

10) 通过小行星探测任务,加强关键技术的研发,进行科学探测和新技术试验验证,大力发展先进科学探测仪器,向轻小型化、低功耗、高性能方向发展,将进一步提升人类对未知领域的探索能力,获取新的科学发现和成果,还能够牵引卫星平台、姿控、测控数传、新材料等工程技术的创新发展。

总的来说,未来小行星探测任务的轨道设计将更为复杂,探测目标将更加多样,对目标的科学探测也将更为全面和深入。

### 3.2 小行星探测主要科学问题

小行星是太阳系中形成最早、形成后物理化学性质改变最少的原始天体。从国际已实施的小行星探测任务关注的科学问题和深空探测的热点科学问题,总结了如下小行星探测的主要科学问题:

#### 1) 小行星轨道演化机制

小行星的轨道演化受多种因素的影响。研究小行星,特别是近地小行星轨道演化机制,评估近地小行星撞击地球的威胁,是小行星探测任务关注的主要科学问题。受限于地基观测能力,对于直径小于1 km的小行星,可以通过近距离探测,全面准确地测量小行星自转、形状和热辐射特性,建立小行星三维形状模型,改进热物理模型(热惯量测定、热传导过程),分析约普效应(YORP Effect)和亚尔科夫斯基效应(Yarkovsky Effect)<sup>[44]</sup>,揭示目标小行星动力学演化规律。

#### 2) 小行星的形成与演化

目前已发现的小行星中,绝大多数分布在小行星主带,距离太阳约3 AU左右。根据提丢斯一波得定则(Titius - Bode Law),在这个位置附近应该存在一个大行星,轨道半长轴 $a$ 为2.8 AU<sup>[45]</sup>。为什么没有形

成一个大行星?这些数目众多的小行星是否由一颗大行星原行星子破裂而成的吗?这也是当今行星科学研究的主要科学问题。

### 3) 太阳系起源与演化历史

在已收集的5万多块陨石中<sup>[46]</sup>,大多可能来自S型、C型和X型小行星。但对于T型、D型和O型等小行星对应的物质却在这些陨石中未被发现。对这类小行星开展探测,有望寻找新的太阳系原始物质,了解其物质的化学成分和矿物组成,研究其演化历史。

另外,大约80%的陨石是原始球粒陨石,形成后没有受过变质作用,其平均化学成分代表了太阳系最原始的物质组成,是原始太阳星云分馏凝聚的产物。还有少数一些铁陨石和石铁陨石是小行星内部岩浆熔融分异的产物,年龄与球粒陨石相仿,也形成于太阳系原始阶段。通过小行星采样返回探测,建立陨石与小行星之间的直接联系,了解这些陨石的来源和陨石母体的特性,为研究太阳系起源和早期演化历史提供了可能。

### 4) 探索地球生命起源

小行星含有生命形成以及生命起源需要的碳基分子(有机分子)、水冰等物质和能量,有学者认为地球上组成生命的有机分子(如:氨基酸)来源于陨石、彗星和宇宙尘埃。通过对这类小行星的探测,将为研究地球生命起源提供新思路。

### 5) 探索恒星演化及其与行星形成的关系

通过陨石的实验室同位素分析,发现一些陨石含有<sup>26</sup>Al、<sup>40</sup>Ca、<sup>53</sup>Mn、<sup>60</sup>Fe等短寿期放射性同位素,有些含有碳化硅、石墨等前太阳恒星尘埃。

通过采样返回探测,有可能获得小行星蕴含的恒星物质,研究恒星的形成和演化历史,以及恒星对太阳系形成所起的作用。

6) 小行星表面积聚了太阳风和太阳高能粒子,为研究太阳活动提供了记录

小行星由于没有大气层和磁场,其表面积聚了大量太阳风和太阳高能粒子。因此,小行星样品记录了太阳活动的历史和空间分布规律。

除了传统意义的小行星, Henry H. Hsieh 和 David Jewitt 于2006年提出“活跃小行星”(或称冰质小行星,也叫主带彗星)的概念<sup>[47-48]</sup>,它指的是轨道位于小行星主带内同时又具有彗星物理特征的小天体。活跃小行星有类似彗发、彗尾的结构,以及喷射气体或尘埃的活动。这种新类别是小行星和彗星之间的过渡形式。活跃小行星同时具有小行星的轨道特征和彗星的物理特征,即其轨道离心率和轨道倾角都与主带

内的小行星相似,同时在外形和成分上又很像彗星,因为它表现出彗星活动的特征,活跃时具有彗发和彗尾。目前已经观测到的“活跃小行星”有15颗,这类“活跃小行星”已成为科研人员非常感兴趣的天体目标,它们的发现是小天体动力学、天体化学和物理学的新进展,为太阳系形成提供了新的启示,存在很多需要研究的科学问题:

### 1) “活跃小行星”的起源和形成问题

一般认为,普通彗星起源于柯伊柏带(海王星轨道外,距离太阳约30~50 AU)或者奥尔特云带(距离太阳3 000~5万 AU),而“活跃小行星”存在于小行星主带内,鉴于其较小的轨道离心率和倾角,动力学模型在理论上否定了普通彗星改变轨道进入主带或者与主带小行星碰撞产生活“跃小行星”的可能性,因此,“活跃小行星”应该形成于小行星主带内,但目前为止还缺少一种“活跃小行星”起源的一致性观点。

### 2) “活跃小行星”气体活动机制问题

“活跃小行星”的气体活动可能是由撞击事件诱发。初始时“活跃小行星”与小行星同时形成于主带内,“活跃小行星”含有丰富的冰冻固体挥发物,表面覆盖有较薄的风化物,本身并无气体活动。当“活跃小行星”遭到其他小行星撞击时,其挥发物或水冰暴露在光照之下,产生升华现象后被观测到,从而被认定为“活跃小行星”。哈勃望远镜对“活跃小行星”596 Scheila<sup>[49]</sup>的观测结果充分地支持了撞击诱因。另一个确定碰撞诱发的“活跃小行星”是P/2010 A2,但是哈勃图像显示其彗尾是由干燥灰尘和砾石组成的,而不是冰升华后的产物。这些现象说明,主带小行星中可能还有一些处于“休眠”状态的“活跃小行星”。

### 3) 其他科学问题

对于“活跃小行星”,尽管科研人员已经取得了一定程度上的认知,但对它们的研究主题还需要继续深化,这些研究问题包括:

“活跃小行星”的普遍性。需要确定在主带中,“活跃小行星”存在的普遍性如何,从而得出它们的真实分布,以及最终的起源和可能的先体天体。综合全天巡天望远镜的使用能够解决当前的观测偏差,对主带内几乎所有天体进行观测,评估小行星的活跃性,研究“活跃小行星”的光谱和其他辨识性特征,确定主带中“活跃小行星”的大致比例和数量。

非活跃期“活跃小行星”的特性。对“活跃小行星”处于非活跃期时进行系统观测和研究,能够帮助



确定彗发中尘土有多少来自于内核, 确定转动周期、内核大小等。利用轨道不同点处更完整的光变曲线, 确定两极的位置, 从而验证季节性活动假说。通过“活跃小行星”的详细光谱测量, 研究其光谱特征, 为“活跃小行星”的鉴别提供依据。

“活跃小行星”的挥发物成分。目前对于“活跃小行星”的组成成分还没有全面的认识。目前的观点认为, 由于地球海洋中氘氢比例远小于普通彗星, 地球上的水并非来自普通彗星。而小行星主带与地球比较接近, 地球水有可能来自于“活跃小行星”。对“活跃小行星”的挥发物进行测定或采样, 尤其是对其氘和氢同位素比例测定, 或许能够解开地球水的来源之谜。通过与其他普通彗星的成分比较, 将使人们了解太阳系形成早期吸积盘挥发份的分布情况。

“活跃小行星”与其它彗星-小行星过渡天体之间的关系需要进行更加深入的研究, 其中, 需要提及的是与流星群有关的近地小行星之间的关系。小行星 3200 Phaethon 可能是 Geminids 的先体, 2001 YB5 在 2002 年形成了一群较弱的流星雨。这些天体都是“阿波罗小行星”, 属于 B 型光谱型, 位于主带的中部和外部, 在近地行星中拥有较高的数量百分比。观测发现活跃小行星 133P 与 Phaethon 在光谱中表现出很大的相似性。因此, 需要有新的、更多的观测数据来揭示“活跃小行星”与活化的 B 型近地小行星之间的可能联系。

## 4 对我国小行星探测的启发

小行星探测是一项多学科综合、高技术集成的系统工程, 体现了一个国家的综合实力和竞争力。开展小行星探测任务, 对于我国的科学研究、技术发展等方面均有重要的意义。

### 4.1 科学研究方面

小行星探测集中了太阳系的起源与演化等众多的前沿科学问题, 最容易产生重大科学发现。通过自主小行星深空探测任务的实施, 开展小行星形成历程、内部结构、自然资源、轨道演化机制、动力学机制等内容的探测, 建立小行星和陨石之间的联系, 研究太阳系形成和演化、地球生命起源、太阳活动等关键课题, 对于加速行星科学的复兴, 增加对行星科学的研究力度, 保证行星科学的地面观测能够和空间探测同步发展等至关重要。

### 4.2 技术发展方面

小行星探测高度综合了现代航天科学及相关技术, 包括航天运载技术、航天器技术、航天测控技术

和航天应用技术等。实施小行星探测可以促进各个领域技术创新, 并牵引一系列的关键技术的突破, 从而推进天文、物理、电子信息、材料科学以及生命科学等相关学科的快速发展。小行星探测还可以作为深空探测技术的演练, 为我国后续深空探测计划作技术的储备。

### 4.3 我国未来自主小行星探测任务科学目标的制定

在 30 多年小天体探测历程中, 美、日等国均先后完成了各自独特的标志性任务, 并取得了非常显著的科学探测成果。我国小行星探测任务应高起点起步, 实现我国深空探测的跨越式发展, 选取有重大科学价值、国际上尚未进行过探测的探测对象, 取得一批原创性的重大科学成果, 使我国行星科学研究进入世界前列。

小行星的探测和研究可大体划分为 3 个阶段: 第 1 阶段是对小行星进行概略式的探测和研究, 主要有地基观测和飞越式探测, 把小行星作为一个“点”来测量, 研究其运动参数和宏观形貌; 第 2 阶段是对小行星的专门探测, 包括遥感和表面就位探测, 主要是进行“面”的探测; 第 3 个阶段是能够对小行星的物质样品进行高精度(实验室)分析, 是对小行星进行“体”的探测和研究。从科学探测和研究的程度看, 对真实样品的研究, 科学上的收益远大于遥感和就位探测。我国的小行星探测科学目标应定位于小行星样品的分析和综合研究为主, 遥感和就位探测为辅, 瞄准小行星采样返回。

通过小行星探测任务获取的科学数据, 测定目标小行星的轨道参数、自转参数、形状大小和热辐射等物理参数, 分析小行星的物理特性, 研究目标小行星的轨道动力学演化。

通过探测小行星形貌、表面物质组分、内部结构、空间风化作用、临近空间环境, 以及可能的水和有机物等生命信息, 获取太阳系早期演化信息, 研究小行星的形成和演化, 为太阳系起源与演化提供重要线索。

通过小行星返回样品, 开展小行星样品的深入、系统和综合分析研究。系统测定小行星样品的物理性质、化学与矿物成分、同位素组成和结构构造, 为小行星的起源与演化、早期太阳系的形成与演化过程提供科学依据; 系统测定和研究小行星样品的年龄, 研究小行星的吸积形成、撞击分裂和行星际空间的运行历史; 与陨石进行比较研究, 建立陨石与小行星、地面观测数据与小行星遥感就位分析数据之间的联系, 拓展、丰富小行星和太阳系起源与演化的研究。

## 5 结束语

我国的小行星探测虽然起步较晚, 但凭借探月工程成功实施的经验, 具备高起点进入小行星探测领域的优势, 小行星探测已成为我国继探月工程、首次火星探测工程之后, 又一项重点规划的深空探测工程。

通过未来小行星探测任务的实施, 不但能够填补我国在小行星伴飞、附着、采样返回和相关科学研究上的空白, 促进比较行星学、空间天文学、空间物理学、空间材料科学等科学领域的创新和发展, 使我国深空探测的科学研究水平迈上一个新的台阶, 而且还能够带动一系列高新技术和基础科学的创新与发展, 同时将成为向全社会宣传科学、普及科学知识, 激励青年一代投身科学研究的重要基础, 具有巨大的社会效益。

### 参 考 文 献

- [1] GB/T 30114.4-2014, 空间科学及其应用术语, 第4部分: 月球与行星科学[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [2] International Astronomical Union (IAU). IAU 2006 general assembly: results of the IAU resolution votes [EB/OL]. [2019-04-21]. <https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau0603/#3>
- [3] International Astronomical Union. Minor planet center: latest published data [EB/OL]. [2019-04-21]. <https://www.minorplanetcenter.net/mpc/summary>.
- [4] Robert Roy Britt. Closest flyby of large asteroid to be Naked-eye visible [EB/OL]. (2005-02-04) [2019-04-21]. <https://www.space.com/769-closest-flyby-large-asteroid-naked-eye-visible.html>.
- [5] RUBIN A E, GROSSMAN J N. Meteorite and meteoroid: new comprehensive definitions [J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 2010, 45 (1): 114-122.
- [6] BOTTKER W F JR, DURDA D D, NESVORNY D, et al. The fossilized size distribution of the main asteroid belt [J]. *Icarus*, 2005, 175: 111-140.
- [7] KERROD R. Asteroids, comets, and meteors [M]. USA: Lerner Publications Co., 2000.
- [8] CNEOS. The center for Near-Earth object studies (CNEOS) discovery statistics [EB/OL]. [2019-04-21]. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>.
- [9] International Astronomical Union (IAU). Minor planet center: list of Jupiter trojans [EB/OL]. [2019-04-21]. <https://minorplanetcenter.net/iau/lists/JupiterTrojans.html>.
- [10] International Astronomical Union (IAU). Minor planet center: list of Mars trojans [EB/OL]. [2019-04-21]. <http://www.minorplanetcenter.org/iau/lists/MarsTrojans.html>.
- [11] International Astronomical Union (IAU). Minor planet center: list of Earth trojans [EB/OL]. [2019-04-21]. <http://www.minorplanetcenter.org/iau/lists/EarthTrojans.html>.
- [12] International Astronomical Union (IAU). Minor planet center: list of Uranus trojans [EB/OL]. [2019-04-21]. <http://www.minorplanetcenter.org/iau/lists/UranusTrojans.html>.
- [13] International Astronomical Union (IAU). Minor planet center: list of Neptune trojans [EB/OL]. [2019-04-21]. <http://www.minorplanetcenter.org/iau/lists/NeptuneTrojans.html>.
- [14] HORNER J, EVANS N W, BAILEY M E. Simulations of the population of centaurs I: the bulk statistics [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, 354 (3): 798-810.
- [15] International Astronomical Union (IAU). Minor planet center: list of transneptunian objects [EB/OL]. [2019-04-21]. <http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/TNOs.html>.
- [16] BUS S J, BINZEL R P. Phase II of the small Main-Belt Asteroid spectroscopic survey: a feature-based taxonomy [J]. *Icarus*, 2002, 158: 146-177.
- [17] BUS S J, BINZEL R P. Phase II of the small Main-Belt Asteroid spectroscopic survey: the observations [J]. *Icarus*, 2002, 106-145.
- [18] DEMEO F E, BINZEL R P, et al. An extension of the Bus Asteroid taxonomy into the near-infrared [J]. *Icarus*, 2009, 202: 160-180.
- [19] POPESCU M, BIRLAN M, NEDELCU D A. Modeling of Asteroid spectra-M4AST [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2012, 554: A130.
- [20] ALEX S, BEN W, BEN Z, et al. Imaging observations of Asteroids with hubble space telescope [J]. *Icarus*, 1999, 137 (2): 260-268.
- [21] ANDERSEN A C, MICHELSEN R, HAACK H, et al. The autonomous Asteroid mapping mission "Bering" [J]. *Acta Astronautica*, 2006, 59: 966-973.
- [22] MARTINOT V, MORBIDELLI A. The EUNEO mission: a european NEO space-based observatory [J]. *Acta Astronautica*, 2006, 59: 679-688.
- [23] AUSTRER H U, RICHTER I, GLASSMEIER K, et al. Magnetic field investigations during Rosetta's 2867 Šteins flyby [J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58 (9): 1124-1128.
- [24] PÄTZOLD M, ANDERT T P, ASMAR S W, et al. Asteroid 21 lutetia: low Mass, high density [J]. *Science*, 2011. 334 (6055): 491-492.
- [25] NASA. Solar system exploration: galileo legacy site [EB/OL]. [2019-04-21]. <https://solarsystem.nasa.gov/galileo/index.cfm>.
- [26] VEVERKA J, BELTON M, KLAASEN K, et al. Galileo's encounter with 951 Gaspra: overview [J]. *Icarus*, 1999, 107 (1): 2-17.
- [27] NASA. NSSDC master catalog: spacecraft - NEAR shoemaker [EB/OL]. [2019-04-21]. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1996-008A>.
- [28] ZUBER M T, SMITH D E, CHENG A F, et al. The shape of 433 Eros from the NEAR- shoemaker laser rangefinder [J]. *Science*, 2000, 289 (5487): 2097-2101.
- [29] YEOMANS D K, ANTREASIAN P G, BARRIOT J P, et al. Radio science results during the NEAR-shoemaker spacecraft rendezvous with Eros [J]. *Science*, 2000, 289 (5487): 2085-2088.
- [30] YEOMANS D K, et al. Estimating the mass of asteroid 253 Mathilde from tracking data during the NEAR flyby [J]. *Science*, 1997, 278 (5346): 2106-2109.
- [31] RAYMAN M D, VARGHESE P, LEHMAN D H, et al. Results from the Deep Space 1 technology validation mission [J]. *Acta Astronautica*, 2000, 47 (2-9): 475-487.
- [32] NASA. Solar system exploration: hayabusa [EB/OL]. [2019-04-21]. <https://solarsystem.nasa.gov/missions/hayabusa/in-depth/>.
- [33] AKIRA F. The rubble-pile Asteroid itokawa as observed by Hayabusa [J]. *Science*, 2006, 312 (5778): 1330-1334.
- [34] YUICHI T, MAKOTO Y, MASANAO A, et al. System design of the

- Hayabusa 2- Asteroid sample return mission to 1999 JU3 [J]. *Acta Astronautica*, 2013, 91: 356-362.
- [35] CLARK S. Japanese spacecraft reaches asteroid after threeandahalfyear journey[EB/OL].[2019-04-21]. <https://www.nature.com/articles/d41586-018-05544-9>.
- [36] Japanese probe drops tiny hopping robots toward big Asteroid Ryugu [EB/OL]. (2018-09-12)[2019-04-21]. <https://www.Space.com>.
- [37] DLR. MASCOT lands safely on asteroid Ryugu[EB/OL]. (2018-10-03) [2019-04-21]. <https://www.nature.com/articles/d41586-018-06928-7>.
- [38] JAXA. Hayabusa2 mission schedule[EB/OL].(2018-10-04)[2019-04-21]. <https://www.nature.com/news/2010/100629/full/466016a.html>.
- [39] MAKOTO Y. Asteroid exploration mission "Hayabusa2 [C]//11th Symposium on Space Science. Japanese: 11th Symposium on Space Science, 2011.
- [40] ZOU X D, LI C L, LIU JJ, et al. The preliminary analysis of the 4179 Toutatis snapshots of the Chang'E-2 flyby [J]. *Icarus*, 2014, 229: 348-354.
- [41] JPL NASA. DAWN:Mission overview [EB/OL]. [2019-04-21]. <https://dawn.jpl.nasa.gov/mission/>.
- [42] NASA. Dawn mission extended at Ceres [EB/OL]. [2019-04-21]. <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6980>.
- [43] NASA. Explorers and heliophysics projects division. OSIRIS-REx factsheet [R]. USA:NASA, 2011.
- [44] BOTTKE J, WILLIAM F, Et al. The Yarkovsky and YORP effects: implications for Asteroid dynamics [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2006. 34: 157-191.
- [45] WAYNE H. Fitting selected random planetary systems to Titius - Bode laws [J]. *ICARUS*, 1998, 135: 549-557.
- [46] The meteoritical society. Meteoritical bulletin database [EB/OL]. [2019-04-21]. <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>.
- [47] JEWITT D. The active Asteroids [EB/OL]. [2019-04-21]. <http://www2.ess.ucla.edu/~jewitt/mbc.html>.
- [48] HENRY H H. Main-Belt Comets [EB/OL]. [2019-04-21]. <https://web.archive.org/web/20110806021852/http://www.ifa.hawaii.edu/~hsieh/mbcs.shtml>.
- [49] JEWITT D, WEAVER H, MUTCHER M, et al. Hubble space telescope observations of main belt Comet (596) Scheila [J]. *Astrophysical Journal Letters*, 2011, 733, L4: 234-239.

作者简介:

李春来(1965-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向:天体化学、行星科学、行星遥感等。

通讯地址:北京市朝阳区大屯路甲20号(100101)

电话:(010)64864963

E-mail:licl@nao.cas.cn

## Overview of Scientific Objectives for Minor Planets Exploration

LI Chunlai<sup>1,2</sup>, LIU Jianjun<sup>1,2</sup>, YAN Wei<sup>1,2</sup>, FENG Jianqing<sup>1,2</sup>, REN Xin<sup>1,2</sup>, LIU Bin<sup>1,2</sup>

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The definition and classification of minor planets are introduced and the main exploration methods of minor planets are presented. The status of current international minor planets exploration is summarized, including the exploration missions which have been implemented and planned to implement, their scientific objectives, scientific payloads, and the main scientific data obtained. Finally, the future development trend of minor planets exploration is discussed and the scientific objectives of China's future autonomous minor planets exploration is prospected.

**Keywords:** minor planets exploration; deep space probe; scientific objectives; scientific payloads; sampling return

**Highlights:**

- Minor planets, especially near-Earth asteroids, have become research hotspots of international deep space exploration in recent years because the remnants of the early formation and evolution of solar system are preserved on the Minor planets.
- Minor planets exploration has entered a new era of space exploration. The targets of exploration will be more varied, and the exploration mission will be more comprehensive and thorough.
- Although the minor planets exploration in China started late, it has the advantage of entering this field at a high starting point based on the successful implementation of lunar exploration project.
- Minor planets exploration has become another focus of China's deep space exploration project.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]